საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ვახტანგ გოგიჩაიშვილი

ინტეგრალური მიკროსქემების ელემენტების ზოგიერთი პარამეტრის განსაზღვრა მათემატიკური მოდელირების მეთოდებით

სპეციალობა – 01.04.01. ფიზიკური ექსპერიმენტის ტექნიკა, ხელსაწყოთა ფიზიკა, ფიზიკურ კვლევათა ავტომატიზაცია.

ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა კანდიდატის სამეცნიერო ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი 2006

ნაშრომი შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: **თენგიზ მხეიძე**

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

რობერტ გოგსაძე

ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა კანდიდატი

ოფიციალური ოპონენტები: **მზევინარ ჩოგოვაძე**
ფიზ. მათ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი
შიფრი: 05.27.01.

ლევან აბულაძე
ფიზ. მათ. მეცნ. კანდიდატი
შიფრი: 01.04.07.

დისერტაციის დაცვა შედგება 2006 წლის «------» «------------» «------» საათზე საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტის Ph.m. 01.27 №7 სადისერტაციო საბჭოს სხდომაზე.

მისამართი: 0175 თბილისი, მ.კოსტავას ქ. №77

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში.

მისამართი: 0175 თბილისი, მ.კოსტავას ქ. №77

ავტორეფერატი დაიგზავნა 2006 წლის «------» «--------------»

სადისერტაციო საბჭოს სწავლული მდივანი
ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი, დოცენტი გ.გოდერძიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. ინტეგრალური მიკროსქემების ტექნოლოგიების სწრაფი განვითარების შედეგად ბოლო ორი ათწლეულის განმავლობაში, ერთ კრისტალზე ფუნქციონალური ელემენტების რაოდენობა მილიონებამდე გაიზარდა. ასეთი მიკროელექტრონული მოწყობილობების თვითღირებულების შემცირება შესაძლებელია მხოლოდ პროექტირებაზე გაწეული დანახარჯების მინიმუმამდე დაყვანით, რაც საშუალებას მოგვცემს თავი დავაღწიოთ ძვირადღირებულ შეცდომებს მათი კონსტრუირებისას. მიკროსქემების ელემენტების ოპტიმიზაციისადმი წმინდა ექსპერიმენტული მიდგომა არსებითად მიუღებელი გახდა, რადგანაც ექსპერიმენტული კვლევები დიდ დროს მოითხოვს და ძვირადღირებულიცაა, ზოგ შემთხვევაში კი, პრაქტიკულად, შეუძლებელიც. ამიტომ აუცილებელი გახდა მათემატიკური მოდელირების მეთოდების გამოყენება ინტეგრალური სქემების პროექტირებისა და დამზადების ყველა ეტაპზე.

ინტეგრალური მიკროსქემების აქტიური ელემენტების გეომეტრიული ზომების მნიშვნელოვანი შემცირებისა და ე.წ. სუბმიკრონული ტექნოლოგიების დანერგვის შედეგად, ელემენტების გარკვეული პარამეტრების განსასაზღვრად აუცილებელი გახდა მათში მიმდინარე ელექტროფიზიკური პროცესების სამგანზომილებიანი მათემატიკური მოდელების გამოყენება, რადგანაც ერთ და ორგანზომილებიანი მოდელები, რომლებიც, ობიექტური თუ სუბიექტური მიზეზების გამო, დღესაც ფართოდ გამოიყენება, ადექვატურად ვერ აღწერენ მიკროსქემების ელემენტებში მიმდინარე ელექტროფიზიკურ პროცესებს, რის შედეგადაც, ხშირ შემთხვევაში, შეუძლებელია თავიდან ავიცილოთ სერიოზული ცდომილებები, როგორც მიკროსქემების პროექტირებისას, ასევე, მათი დამზადებისას.

ინტეგრალური მიკროსქემების ელემენტების მათემატიკური მოდელირების მეთოდი შეისწავლის ელემენტის მახასიათებელი პარამეტრების ურთიერთკავშირს კერძოწარმოებულიანი დიფერენციალური განტოლებების, ასევე შესაბამისი სასაზღვრო, საკონტაქტო და საწყისი პირობების საშუალებით.

კერძოწარმოებულიანი დიფერენციალური განტოლებების შემცველი სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნის ე.წ. რიცხვითი მეთოდები (სასრული სხვაობების მეთოდი და სასრული ელემენტების მეთოდი), რომლებიც ამჟამად გამოიყენება ელემენტების მათემატიკური მოდელირების პროცესში და რომლებიც დომინირებს ამ საკითხისადმი მიძღვნილ სამეცნიერო ლიტერატურასა თუ სხვადასხვა სამეცნიერო ნაშრომებში, სასურველ შედეგებს იძლევა ერთ და ორგანზომილებიანი ამოცანების რეალიზებისას. რაც შეეხება სამგანზომილებიან ამოცანებს, აქ რიცხვითი მეთოდების გამოყენება დაკავშირებულია დროისა და მეტერიალური რესურსების დიდ დანახარჯებთან და თანაც, ხშირ შემთხვევაში, ვერ უზრუნველყოფს შედეგების სასურველ სიზუსტეს. ამდენად, სამგანზომილებიანი სასაზღვრო ამოცანები, რომლებიც აღწერენ მექანიკურ, სითბურ და ელექტრულ პროცესებს მიკროელექტრონულ მოწყობილობებში, ნაკლებადაა შესწავლილი.

ამიტომ ჩვენ მიგვაჩნია, რომ სადისერტაციო ნაშრომში შემუშავებული სამგანზომილებიანი სასაზღვრო ამოცანების ერთი კლასის ამოხსნის მეთოდი და მის საფუძველზე სამგანზომილებიანი ბიპოლარული ტრანზისტორული სტრუქტურების რეზისტიული და ტევადობითი მახასიათბლების განსაზღვრის მეთოდები გარკვეულ

წვლილს შეიტანს ინტეგრალური მიკროსქემების პროექტირების შემდგომი სრულყოფის საქმეში, როგორც ელემენტების პარამეტრების პრაქტიკული გათვლის თვალსაზრისით, ასევე მათში მიმდინარე ელექტრო-ფიზიკური პროცესების კვლევის თვალსაზრისით.

ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს ინტეგრალური მიკროსქემების ფუნქციური ელემენტების სამგანზომილებიანი მათემატიკური მოდელირების მეთოდების შემუშავება მიკროსქემების პროექტირებისა და კონსტრუირების სხვადასხვა ეტაპზე მათი გამოყენების მიზნით.

აქ იგულისხმება შემდეგი:

- პუასონის განტოლების სამგანზომილებიანი სასაზღვრო ამოცანის დასმა ბიპოლარული ტრანზისტორული სტრუქტურების შემადგენელ ნაწილებში (ემიტერი, ბაზა, კოლექტორი) განსაზღვრული სტაციონარული ელექტრული ველების პოტენციალბის მიმართ შერეული ტიპის სასაზღვრო პირობებით ზედაპირებზე. ეს სასაზღვრო პირობები განისაზღვრება ტრანზისტორის ტოპოლოგიური მონაცემების, ფიზიკური მახასიათებლების და მუშაობის რეჟიმებიდან გამომდინარე.
- აღნიშნული სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნის მეთოდების შემუშავება.
- სამგანზომილებიანი ბიპოლარული ტრანზისტორული სტრუქტურების რეზის-ტიული და ტევადობითი მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდების შემუ-შავება.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

1. შემუშავებულია პუასონის განტოლების სამგანზომილებიანი სასაზღვრო ამოცანების მიახლოებითი ანალიზური ამოხსნის მეთოდი სტაციონარული ელექტრული ველების პოტენციალის მიმართ. მიღებული ამოხსნის ანალიზური გამოსახულება ცხადი სახით შეიცავს გამოსაკვლევი სტრუქტურების გეომეტრიულ პარამეტრებს და გამოყენებული მასალების ფიზიკურ მახასიათებლებს. ეს გარემოება, საშუალებას იძლევა, საჭიროების შემთხვევაში, მოვახდინოთ განსასაზღვრი პარამეტრების ვარირება საწყის ინფორმაციაზე დამოკიდებულებით.
2. შემუშავებულია ბიპოლარული ტრანზისტორების ემიტერისა და ბაზის აქტიური წინააღმდეგეობების განსაზღვრის მეთოდიკა სამგანზომილებიანი მათემატიკური მოდელის საფუძველზე.
3. შემუშავებულია დაბალომური ფენის შემცველი კოლექტორის აქტიური წინაღობის განსაზღვრის მეთოდიკა სამგანზომილებიანი მათემატიკური მოდელის საფუძველზე.
4. შემუშავებულია სამგანზომილებიანი ბიპოლარული ტრანზისტორული სტრუქტურების ტევადობითი მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდიკა ტრანზისტორში სტაციონარული ელექტრული ველის სრული ენერგიის მნიშვნელობის საშუალებით.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება. სადისერტაციო ნაშრომში შემუშავებული რეზისტიული და ტევადური მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდიკა დაფუძნებულია მათემატიკური ფიზიკის გარკვეული კლასის სამგანზომილებიანი

სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნის მეთოდების გამოყენებაზე. ეს მეთოდები, რომლებიც ასევე შემუშავებულია მოცემულ ნაშრომში, ანალოგიური ამოცანების ამოხსნის ცნობილ რიცხვით მეთოდებთან შედარებით, უზრუნველყოფს ინტეგრალური მიკროსქემების ელემენტების პარამეტრების განსაზღვრას ბევრად უფრო მაღალი სიზუსტით, ასევე ამ მეთოდების გამოყენებით შესაძლებელია გამოთვლითი ექსპერიმენტების ჩატარება დროისა და მატერიალური რესურსების მინიმალური დანახარჯებით, რაც საბოლოო ჯამში ამცირებს მიკროელექტრონული ხელსაწყოების პროექტირებისა და კონსტრუირების თვითღირებულებას.

ნაშრომში მიღებული შედეგების გამოყენების სფერო არ შემოისაზღვრება მხოლოდ მიკროელექტრონიკით. ისინი, შესაძლებელია, გამოყენებული იქნეს ფიზკისა და ტექნიკის რიგი სხვა ამოცანების გადასაწყვეტადაც.

დაცვაზე გამოგვაქვს შემდეგი ძირითადი დებულებები:

1. სტაციონარული ელექრული ველის პოტენციალის მიმართ პუასონის სამგანზომილებიანი სასაზღვრო ამოცანის მიახლოებითი ანალიზური ამოხსნის მეთოდის შემუშავება, ტრანზისტორული სტრუქტურის ზედაპირზე შერეული სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით.
2. ემიტერისა და ბაზის აქტიური წინააღმდეგობების განსაზღვრის მეთოდიკის შემუშავება ბიპოლარული ტრანზისტორის სამგანზომილებიანი მოდელის საფუძველზე.
3. დაბალომური ფენის შემცველი კოლექტორის აქტიური წინააღმდეგობის განსაზღვრის მეთოდიკის შემუშავება ბიპოლარული ტრანზისტორის სამგანზომილებიანი მოდელის საფუძველზე.
4. სამგანზომილებიანი ტრანზისტორული სტრუქტურების ტევადური მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდიკის შემუშავება ელექტრული ველის სრული ენერგიის მნიშვნელობის საშუალებით.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იყო მიკროელექტრონიკის სამეცნიერო-საინჟინრო ცენტრისა და ნახევარგამტარული მიკროელექტრონიკისა და ფიზიკური მასალათმცოდნეობის კათედრის ერთობლივ სხდომაზე, მიკროელექტრონიკისა და ნახევარგამტარული ხელსაწყოების ფიზიკის საკითხებისადმი მიძღვნილ IV რესპუბლიკურ კონფერენციაზე (თბილისი, 1980), სტუ-ს 80 წლისადმი მიძღვნილ, პროფესორ-მასწავლებელთა საიუბილეო კონფერენციაზე (თბილისი, 2002).

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 4 სამეცნიერო ნაშრომი, მათ შორის – ერთი მონოგრაფია. ნაშრომების ჩამონათვალი მოცემულია ავტორეფერატის ბოლოს.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, ხუთი თავის, დასკვნების, ციტირებული ლიტერატურის ნუსხისა და დანართისაგან.

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

შესავალ ნაწილში მოცემულია პრობლემის ზოგადი აღწერა, მდგომარეობა და აქტუალობა. აღწერილია სამუშაოს მიზანი და კვლევის მიმართულებები.

პირველი თავი წარმოადგენს სამეცნიერო ლიტერატურული მონაცემების მიმოხილვას.

მეორე თავი ეძღვნება სამგანზომილებიანი სასაზღვრო ამოცანის დასმას პუასონის განტოლებისათვის სტაციონარული ელექტრული ველის პოტენციალისათვის (u), რომელიც განსაზღვრულია საკმარისად გლუვი, შეკრული S ზედაპირით შემოსაზღვრულ სამგანზომილებიან $G \in R^3$ არეში და აკმაყოფილებს განტოლებას:

$$\Delta u = f(M), \quad M = \{x_1, x_2, x_3\} \in G \tag{1}$$

სადაც $f(M) \in C^1(G), u(M) \in C^2(G)$ ($C^1(G)$ და $C^2(G)$) G არეში უწყვეტად დიფერენცირებადი და ორჯერ უწყვეტად დიფერენცირებადი ფუნქციების კლასებია, შესაბამისად).

ვთქვათ, S - ზედაპირი შედგება სამი ნაწილისაგან: S_1, S_2, S_3 (საზოგადოდ, შემადგენელი ნაწილების რაოდენობა შეიძლება ნებისმიერი იყოს) და საძებნი $u(M)$ ფუნქცია აკმაყოფილებს S –ზე შემდეგ პირობებს:

$$u(M) = \psi_1(M_{S_1}), \quad M \in S_1 \tag{2}$$

$$u(M) = \psi_2(M_{S_2}), \quad M \in S_2 \tag{3}$$

$$\frac{\partial u(M)}{\partial \nu} = \varphi_3(M_{S_3}), \quad M \in S_3 \tag{4}$$

სადაც $\psi_1, \psi_2 \in C^1(S), \ \varphi \in C(S),$ ხოლო $\vec{\nu}$ _ არის $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$ ზედაპირის გარე ნორმალია (ნახ.1).

ამავე თავში მტკიცდება (1)÷(4) სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნის ერთადერთობა. ამოხსნის არსებობის საკითხი განხილულია მომდევნო თავში.

მესამე თავში გადმოცემულია (1)÷(4) სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნის მეთოდი.

$R^3 \backslash G$ არეში (G - არის შემომსაზღვრავი S ზედაპირის გარეთ) განვიხილოთ შეკრული ზედაპირი S_0, რომელიც მთლიანად მოიცავს S –ს და არ გააჩნია მასთან საერთო წერტილები. ვთქვათ $\{M_0^k\}_{k=1}^{\infty} = \{z_1^k, z_2^k, z_3^k\}_{k=1}^{\infty} \in S_0$ არის S_0 –ზე ყველგან მკვრივად განლაგებული წერტილთა სისტემა, ე.ი. S_0 –ის ნებისმიერი, რაგინდ მცირე ელემენტში ამ სისტემის ერთი წერტილი მაინც არსებობს (ნახ. 1).

ანალოგიურად შემოგვაქვს S – ზედაპირზე განლაგებული წერტილთა სისტემები:

$$\{M_1^k\}_{k=1}^{\infty} \in S_1, \quad \{M_2^k\}_{k=1}^{\infty} \in S_2 \quad \text{და} \quad \{M_3^k\}_{k=1}^{\infty} \in S_3 .$$

ასევე განვიხილოთ ლაპლასის ოპერატორის ფუნდამენტურ ამოხსნათა სისტემა

$$\omega_k(M) = \left[r\left(M, M_0^k\right)\right]^{-1}, \ (k = 1, 2, \ldots) \tag{5}$$

რომელიც არის წრფივად დამოუკიდებელი, სრული სისტემა $L_2(S)$ სივრცეში (კვადრატში ინტეგრებადი ფუნქციები S-ზე) და სივრცეში $C(S)$ (უწყვეტ და შემოსაზღვრული ფუნქციები S-ზე).

შემდეგ ზემოთ შემოტანილი წერტილთა უსასრულო $\left\{M_0^k\right\}_{k=1}^{\infty}$, $\left\{M_1^k\right\}_{k=1}^{\infty}$, $\left\{M_2^k\right\}_{k=1}^{\infty}$ და $\left\{M_3^k\right\}_{k=1}^{\infty}$ სისტემებიდან გამოვყოთ სასრული ქვესისტემები, შესაბამისად:

$\left\{M_0^k\right\}_{k=1}^{N}$, $\left\{M_1^k\right\}_{k=1}^{n}$, $\left\{M_2^k\right\}_{k=1}^{m}$, $\left\{M_3^k\right\}_{k=1}^{e}$, სადაც $N = n + m + e$.

განიხილება შემდეგი ფუნქცია:

$$u_N(M) = \frac{1}{\delta}\begin{vmatrix} \omega_0(M), \ \omega_1(M), \ \omega_2(M), \ \ldots \ \omega_N(M) \\ \omega_0\left(M_{S_1}^1\right) - \psi_1\left(M_{S_1}^1\right), \ \omega_1\left(M_{S_1}^1\right), \ \omega_2\left(M_{S_1}^1\right), \ \ldots \ \omega_N\left(M_{S_1}^1\right) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \omega_0\left(M_{S_1}^n\right) - \psi_1\left(M_{S_1}^n\right), \ \omega_1\left(M_{S_1}^n\right), \ \omega_2\left(M_{S_1}^n\right), \ \ldots \ \omega_N\left(M_{S_1}^n\right) \\ \omega_0\left(M_{S_2}^1\right) - \psi_2\left(M_{S_2}^1\right), \ \omega_1\left(M_{S_2}^1\right), \ \omega_2\left(M_{S_2}^1\right), \ \ldots \ \omega_N\left(M_{S_2}^1\right) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \omega_0\left(M_{S_2}^m\right) - \psi_2\left(M_{S_2}^m\right), \ \omega_1\left(M_{S_2}^m\right), \ \omega_2\left(M_{S_2}^m\right), \ \ldots \ \omega_N\left(M_{S_2}^m\right) \\ \left.\frac{\partial\omega_0}{\partial\nu}\right|_{M_{S3}^1} - \phi\left(M_{S_3}^1\right), \ \left.\frac{\partial\omega_1}{\partial\nu}\right|_{M_{S3}^1}, \ \left.\frac{\partial\omega_2}{\partial\nu}\right|_{M_{S3}^1} \ \ldots \ \left.\frac{\partial\omega_N}{\partial\nu}\right|_{M_{S3}^1} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \left.\frac{\partial\omega_0}{\partial\nu}\right|_{M_{S3}^e} - \phi\left(M_{S_3}^e\right), \ \left.\frac{\partial\omega_1}{\partial\nu}\right|_{M_{S3}^e}, \ \left.\frac{\partial\omega_2}{\partial\nu}\right|_{M_{S3}^e} \ \ldots \ \left.\frac{\partial\omega_N}{\partial\nu}\right|_{M_{S3}^e} \end{vmatrix}, \tag{9}$$

სადაც δ არის $\omega_0(M)$ ელემენტის ალგებრული დამატება (9) ტოლობის მარჯვენა მხრის დეტერმინანტში, ხოლო

$$\omega_0(M) = -\frac{1}{4\pi}\iiint_G \frac{f\left(M_\xi\right)}{r\left(M_1 M_\xi\right)} dv_\xi, \tag{10}$$

$$M_\xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3\}, \ r\left(M_1 M_\xi\right) = \left[(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2\right]^{\frac{1}{2}},$$

$$dv_\xi = d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3.$$

დეტერმინანტებისა და ლაპლასის ოპერატორის ფუნდამენტური ამოხსნების ზოგიერთი თვისების გათვალისწინებით მტკიცდება შემდეგი ტოლობების სამართლიანობა:

$$\Delta u_N(M)=\Delta\omega_0(M),\ \ M\in G \tag{11}$$

$$\Delta\omega_0(M)=f(M),\ \ M\in G \tag{12}$$

ე.ი.:

$$\Delta u_N(M)=f(M),\quad u_N(M)\in C^2(G),\quad M\in G \tag{13}$$

ეს ნიშნავს, რომ განსახილველი ფუნქცია $u_N(M)$ აკმაყოფილებს (1) განტოლებას G-ში.

შემდეგ დამტკიცებულია, რომ ფუნქცია $u_N(M)$ აკმაყოფილებს (2) და (3) სასაზღვრო პირობებს წერტილებში $\{M_1^k\}_{k=1}^n$ და $\{M_2^k\}_{k=1}^m$ და, შესაბამისად, (3) სასაზღვრო პირობასაც წერტილებში $\{M_3^k\}_{k=1}^e$, ე.ი.:

$$u_N\left(M_{S_1}^k\right)=\psi_1\left(M_{S_1}^k\right),\quad k=1,2,\ldots n \tag{14}$$

$$u_N\left(M_{S_2}^k\right)=\psi_2\left(M_{S_2}^k\right),\quad k=1,2,\ldots m \tag{15}$$

$$\left.\frac{\partial u_N}{\partial \nu}\right|_{M_{S3}^k}=\varphi\left(M_{S_3}^k\right),\quad k=1,2,\ldots e \tag{16}$$

ზემოთ თქმულიდან გამომდინარეობს, რომ ფუნქცია (9) არის შემდეგი სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნა:

$$\Delta u_N(M)=f(M),\ \ M\in G \tag{17}$$

$$u_N\Big|_{\{M_{S1}^k\}_{k=1}^n}=\psi_1\left(M_{S_1}\right),\quad M_{S_1}\in S_1, \tag{18}$$

$$u_N\Big|_{\{M_{S2}^k\}_{k=1}^m}=\psi_2\left(M_{S_2}\right),\quad M_{S_2}\in S_2, \tag{19}$$

$$\left.\frac{\partial u_N}{\partial \nu}\right|_{\{M_{S3}^k\}_{k=1}^e}=\varphi\left(M_{S_3}\right),\quad M_{S_3}\in S_3. \tag{20}$$

რადგანაც ფუნქციათა მიმდევრობა $\{u_N(M)\}_{N=1}^{\infty}$ ზუსტად აკმაყოფილებს (1) განტოლებას წერტილში $M\in G$ და ლაპლასის ფუნდამენტურ ამოხსნათა სისტემა $\{\omega_i(M)\}_{i=1}^{\infty}$ არის სრული სისტემა $C^2(S)$ სივრცეში, ცხადია, რომ, როცა $n\to\infty$, მაშინ $u_N(M)\to u(M)$, სადაც $u(M)$ არის (1)÷(4) სასაზღვრო ამოცანის ზუსტი ამოხსნა. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ ფუნქცია $u(M)$, განსაზღვრული (9) ტოლობით, წარმოადგენს (1)÷(4) სასაზღვრო ამოცანის მიახლოებით ამოცანას.

მეოთხე თავში გადმოცემულია ბიპოლარული ტრანზისტორული სტრუქ-ტურების რეზიტიული მახასიათებლების (ემიტერის, ბაზისა და კოლექტორის

ელექტრული წინააღმდეგობები) განსაზღვრის მეთოდები სამგანზომილებიანი მათემატიკური მოდელის საფუძველზე.

S ზედაპირით შემოსაზღვრული ლეგირებული ნახევარგამტარით შევსებული დენგამტარი არის $G \in R^3$ ელექტრული წინაღობა დამოკიდებულია მასში ელექტრული ველის სტრუქტურაზე და მინარევული ატომებით ლეგირების ხარისხზე.

ბიპოლარული ტრანზისტორის შემადგენელი ნაწილების რეზისტიული მახასიათებლების განსაზღვრისას სამგანზომილებიანი G არე წარმოადგენს ემიტერის, ბაზის ან კოლექტორის არეს, იმის მიხედვით თუ რომელი მათგანის ელექტრული წინაღობა განისაზღვრება. მიკროსქემების ტექნოლოგიური და ტოპოლოგიური თავისებურებებიდან გამომდინარე ამ არეების ზედაპირები სიბრტყეების ერთობლიობას წარმოადგენს. ამ ზედაპირების ნაწილი (S_1 და S_{10}) დაფარულია ომური კონტაქტებით, ხოლო ნაწილი (S_2) გარეთა მხრიდან შეხებაშია იზოლატორთან (ნახ. 2).

S_1 და S_{10} ზედაპირებზე, შესაბამისად, მოდებულია ელექტრული პოტენციალები $\psi_1 = const$ და $\psi_{10} = const$ $(\psi_1 \neq \psi_{10})$. ცხადია, ასეთ პირობებში G არეში იარსებებს სტაციონარული ელექტრული ველი და მასში გაივლის დენი რაიმე $\vec{J}$ სიმკვრივით. ტოლობა $J_\nu = 0$, რომელსაც ადგილი აქვს S_2 ზედაპირზე ($\vec{\nu}$ - ამ ზედაპირის გარე ნორმალია) წარმოადგენს ელელქტრული მუხტის შენახვის კანონს S_2 – ზე.

აღსანიშნავია, რომ ემიტერისა და ბაზის არეები ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან მხოლოდ კონფიგურაციით და ომური კონტაქტების განლაგებით. ამიტომ ამ ორი არის ელექტრული წინაღობის განსაზღვრის მეთოდებს შორის პრინციპული განსხვავება არ არსებობს.

რაც შეეხება კოლექტორს, აქ, როგორც წესი, თავს იჩენს გარკვეული სირთულეები ელექტრული წინაღობის განსაზღვრისას. საქმე იმაშია, რომ კოლექტორული არის დამზადების დროს გამოიყენება ზოგიერთი ტექნოლოგიური თავისებურება. კერძოდ, ბიპოლარული ტრანზისტორის დამზადებისას კოლექტორის არეში ქმნიან გარკვეული სისქის დაბალომურ ფენას, ე.წ. ფარულ ფენას (ნახ. 3). ცხადია, რომ დაბალომური ფენის კონტაქტი (საკონტაქტო ზედაპირი, როგორც წესი, სიბრტყეს წარმოადგენს) კოლექტორის დანარჩენ ნაწილთან (მათ სხვადასხვა გამტარებლობები ახასიათებთ) გავლენას ახდენს ელექტრული ველის სტრუქტურაზე G-ში,ეს კი იწვევს კოლექტორის წინაღობის მნიშვნელოვან ცვლილებას, კერძოდ, შემცირებას. სწორედ ეს არის კოლექტორში ფარული ფენის შექმნის მიზანი. აღნიშნული თავისებურება აუცილებლად უნდა იქნას გათვალისწინებული კოლექტორში ელექტრული ველის სტრუქტურის განსაზღვრისას.

ომის კანონის თანახმად, G-ს ელექტროგამტარებლობა, მის საკონტაქტო S_1 და S_{10} ზედაპირებზე ψ_1 და ψ_{10} $(\psi_1 \neq \psi_{10})$ პოტენციალების არსებობისას, ტოლია:

$$\rho_G = \frac{1}{R_G} = \frac{I_{S_1}}{V_G}, \tag{21}$$

სადაც R_G - წინაღობის სიდიდეა, $V_G = \psi_{10} - \psi_1$, ხოლო

$$I_{S_1} = \iint\limits_{S_1} \chi \frac{\partial u}{\partial v} ds \qquad (22)$$

წარმოადგენს S_1 კონტაქტში გამავალ დენს; χ – იმ ნახევარგამტარული მასალის კუთრი გამტარებლობაა, რომლითაც შევსებულია G; (შემდგომში ვიგულისხმებთ, რომ $\chi = const$); $u = u(M)$ $(M = \{x_1, x_2, x_3\} \in G)$ არის ელექტრული ველი G-ში; $\vec{v}$ – S_1-ის გარე ნორმალია.

ტრანზისტორის სხვადასხვა ნაწილების წინაღობაში ჩვენ ვგულისხმობთ მათი ელექტრონეიტრალური არეების წინაღობას, ამიტომ G-ში ელექტრული ველის წყაროები არ არსებობენ და სასაზღვრო ამოცანას ელექტრული ველის პოტენციალისათვის ექნება შემდეგი სახე:

$$\Delta u(M) = 0, \qquad M \in G, \qquad (23)$$

$$u = \psi_1, \qquad S_1\text{-ზე} \qquad (24)$$

$$u = \psi_{10}, \qquad S_{10}\text{-ზე} \qquad (25)$$

$$\frac{\partial u}{\partial v} = 0, \qquad S_2\text{-ზე} \qquad (26)$$

წარმოვადგინოთ $u(M)$ ორი ფუნქციის $u_1(M)$ და $u_2(M)$-ის წრფივ კომბინაციად :

$$u(M) = \psi_1 u_1(M) + \psi_{10} u_2(M), \quad M \in G \qquad (27)$$

სადაც $u_1(M)$ და $u_2(M)$ წარმოადგენენ, შესაბამისად, შემდეგი სასაზღვრო ამოცანების ამონახსნებს:

$$\Delta u_1(M) = 0, \qquad G\text{-ში} \qquad (28)$$

$$u_1 = 1, \qquad S_1\text{-ზე} \qquad (29)$$

$$u_1 = 0, \qquad S_{10}\text{-ზე} \qquad (30)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial v} = 0, \qquad S_2\text{-ზე} \qquad (31)$$

და

$$\Delta u_2(M) = 0, \qquad G\text{-ში} \qquad (32)$$

$$u_2 = 0, \qquad S_1\text{-ზე} \qquad (33)$$

$$u_2 = 1, \qquad S_{10}\text{-ზე} \qquad (34)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial v} = 0, \qquad S_2\text{-ზე} \qquad (35)$$

ცხადია, რომ $u_1(M) + u_2(M) \equiv 1$ G-ში. ასევე ცხადია, რომ (27) აკმაყოფილებს (23)÷(26) სასაზღვრო ამოცანას.

გარდავქმნათ (27) შემდეგნაირად:

$$u(M)=\psi_1 u_1(M)+\psi_{10}[1-u_1(M)]$$

$$u(M)=(\psi_1-\psi_{10})u_1(M)+\psi_{10} \tag{36}$$

$$u(M)=-V_G u_1(M)+\psi_{10}$$

(36)-ის გადიფერენციალება გვაძელვს:

$$\frac{\partial u(M)}{\partial v}=-V_G\frac{\partial u_1(M)}{\partial v} \tag{37}$$

(24) ტოლობაში (37)-ის გათვალისწინება გვაძლევს:

$$I_{S_1}=-\chi V_G\iint\limits_{S_1}\frac{\partial u_1}{\partial v}ds \tag{38}$$

საიდანაც გამომდინარეობს:

$$\frac{1}{R_G}=\left|\chi\iint\limits_{S_1}\frac{\partial u_1}{\partial v}ds\right| \tag{39}$$

G არის გამტარებლობას ჩვენ ვუწოდებთ S_1 კონტაქტში გამავალი დენის ძალის აბსოლუტურ მნიშვნელობას, როცა $\psi_1=1$ და $\psi_{10}=0$. ამ გამტარებლობის შებრუნებული სიდიდე წარმოადგენს განსახილავი არის წინაღობას. ე.ი. ტრანზისტორის შემადგენელი ნაწილების ელექტრულ წინაღობას ჩვენ განვსაზღვრავთ (39) ფორმულით, სადაც $u_1(M)$ არის (28)÷(31) სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნა.

ემიტერისა (ან ბაზის) წინაღობების გამოსახულებების ასაგებად საჭიროა ამოვხსნათ (28)÷(31) სასაზღვრო ამოცანა როცა G წარმოადგენს ემიტერის (ან ბაზის) არეს.

ცხადია, რომ ამოცანა (28)÷(31) წარმოადგენს (1)÷(4) სასაზღვრო ამოცანას კერძო შემთხვევას.

ზემოთ მოყვანილი მსჯელობის ანალოგიურად S_1, S_{10} და S_2 ზედაპირებზე დავაფიქსიროთ წერტილთა სიმრავლეები: $\{M_{S_1}^k\}_{k=1}^n$, $\{M_{S_{10}}^k\}_{k=1}^m$, და $\{M_{S_2}^k\}_{k=1}^e$, $(n+m+e=N)$, შესაბამისად $S_0\in(R^3\setminus G)$ ზედაპირზე შემოვიტანოთ სიმრავლე $\{M_0^k\}_{k=1}^N$. (23)÷(26) სასაზღვრო ამოცანიდან გამომდინარე ადგილი ექნება შემდეგ ტოლობებს:

$$\omega_0(M)=0,\quad M\in G \tag{40}$$

$$\frac{\partial\omega_0(M)}{\partial v}=0,\quad M\in G \tag{41}$$

$$\psi_1(M_{S_1}^k)=1,\quad k=1,2,\ldots n \tag{42}$$

$$\psi_{10}(M_{S_{10}}^k)=0,\quad k=1,2,\ldots m \tag{43}$$

$$\varphi\left(M_{S2}^{k}\right)=0, \quad k=1, 2, \ldots e \tag{44}$$

მაშინ (28÷31) ამოცანის ამოხსნას ექნება სახე:

$$u_{1N}(M)=\frac{1}{\delta}\begin{vmatrix} -1, \ \omega_1\left(M_{S_1}^{1}\right), \ \omega_2\left(M_{S_1}^{1}\right), \ldots, \ \omega_N\left(M_{S_1}^{1}\right) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ -1, \ \omega_1\left(M_{S_1}^{n}\right), \ \omega_2\left(M_{S_1}^{n}\right), \ldots, \ \omega_N\left(M_{S_1}^{n}\right) \\ 0, \ \omega_1\left(M_{S_{10}}^{1}\right), \ \omega_2\left(M_{S_{10}}^{1}\right), \ldots, \ \omega_N\left(M_{S_{10}}^{1}\right) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ 0, \ \omega_1\left(M_{S_{10}}^{m}\right), \ \omega_2\left(M_{S_{10}}^{m}\right), \ldots, \ \omega_N\left(M_{S_{10}}^{m}\right) \\ 0, \ \left.\frac{\partial\omega_1}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{1}}, \ \left.\frac{\partial\omega_2}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{1}}, \ldots, \ \left.\frac{\partial\omega_N}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{1}} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ 0, \ \left.\frac{\partial\omega_1}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{e}}, \ \left.\frac{\partial\omega_2}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{e}}, \ldots, \ \left.\frac{\partial\omega_N}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{e}} \end{vmatrix} \tag{45}$$

(39) ტოლობის გათვალისწინებით ემიტერის (ბაზის) ელექტრული წინაალმდეგობისათვის მივიღებთ:

$$\frac{1}{R_{Ge(b)}}\approx\frac{1}{\delta}\begin{vmatrix} 0, \ \alpha_1, \ \alpha_2, \ldots, \ \alpha_N \\ -1, \ \omega_1\left(M_{S_1}^{1}\right), \omega_2\left(M_{S_1}^{1}\right), \ldots, \omega_N\left(M_{S_1}^{1}\right) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ -1, \ \omega_1\left(M_{S_1}^{n}\right), \omega_2\left(M_{S_1}^{n}\right), \ldots, \omega_N\left(M_{S_1}^{n}\right) \\ 0, \ \omega_1\left(M_{S_{10}}^{1}\right), \omega_2\left(M_{S_{10}}^{1}\right), \ldots, \omega_N\left(M_{S_{10}}^{1}\right) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ 0, \ \omega_1\left(M_{S_{10}}^{m}\right), \omega_2\left(M_{S_{10}}^{m}\right), \ldots, \omega_N\left(M_{S_{10}}^{m}\right) \\ 0, \ \left.\frac{\partial\omega_1}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{1}}, \ \left.\frac{\partial\omega_2}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{1}}, \ldots, \ \left.\frac{\partial\omega_N}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{1}} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ 0, \ \left.\frac{\partial\omega_1}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{e}}, \ \left.\frac{\partial\omega_2}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{e}}, \ldots, \ \left.\frac{\partial\omega_N}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^{e}} \end{vmatrix}, \tag{46}$$

სადაც:

$$\alpha_i=-\iint\limits_{S_1}\chi\frac{\partial\omega_i}{\partial\nu}ds, \quad (i=1, 2, \ldots, N) \tag{47}$$

თუ მართკუთხა კოორდინატთა სისტემას მოვათავსებთ ისე, რომ $x_3=0$ სიბრტყე დაემთხვეს S_1 ზედაპირს, მაშინ ადგილი ექნება შემდეგ ტოლობებს:

$$\frac{\partial}{\partial \nu}=\frac{\partial}{\partial x_3}, \quad ds=dx_1dx_2$$

და

$$\alpha_i=-\iint\limits_{S_1}\chi\frac{\partial\omega_i}{\partial x_3}dx_1dx_2 \tag{48}$$

განვსაზღვროთ დაბალომური ფენის შემცველი კოლექტორის წინაღობა.

χ_0 კუთრი გამტარებლობის მქონე დაბალომიანი ფენის არე აღვნიშნოთ G_0-ით, ხოლო კოლექტორის ძირითადი ნაწილი, რომლის კუთრი გამტარებლობაა – χ_c, G_c-თი.

განვიხილოთ სამგანზომილებიანი არე $G=G_c\cup G_0\in R^3$, რომელიც შედგება სხვადასხვა გამტარებლობის მქონე $(\chi_c\neq\chi_0)$ ორი ელექტრონეიტრალური ნაწილისაგან, რომელთა გამყოფი ზედაპირი არის სიბრტყე და რომელიც შემოსაზღვრულია შეკრული ზედაპირით $S=S_1\cup S_{10}\cup S_2$. გამყოფი სიბრტყის განტოლება იყოს $x_3=-H$ (ნახ. 3). S -ზედაპირის ის ნაწილი, რომლითაც შემოსაზღვრულია G_c, აღვნიშნოთ Γc, ხოლო G_0-ის შემოსაზღვრული ზედაპირი - Γo-ით.

განვიხილოთ შემდეგი სასაზღვრო ამოცანა:

$$\Delta u(M)=0, \quad M\in G, \tag{49}$$

$$u=1, \quad S_1\text{-ზე} \tag{50}$$

$$u=0, \quad S_{10}\text{-ზე} \tag{51}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \nu}=0, \quad S_2\text{-ზე} \tag{52}$$

სადაც:

$$u(M)=\begin{cases}u_1(M), & M\in G_c\\ u_2(M), & M\in G_0\end{cases} \tag{53}$$

$$u_1=u_2, \quad \text{როცა} \quad x_3=-H \tag{54}$$

$$\chi_c\frac{\partial u_1}{\partial x_3}=\chi_0\frac{\partial u_2}{\partial x_3}, \quad \text{როცა} \quad x_3=-H \tag{55}$$

$u_1(M)$ და $u_2(M)$ ჰარმონიული ფუნქციებია G_c-ში და G_0-ში, შესაბამისად. ამასთან $u_1(M)$ - აკმაყოფილებს (50)÷(52) პირობებს Γc-ზე, ხოლო $u_2(M)$ - (52)-ს Γo-ზე.

ავაგოთ ლაპლასის ოპერატორის ფუნდამენტურ ამოხსნათა შემდეგი სისტემა:

$$\gamma_k(M)=\begin{cases}\gamma_k^c(M), & M\in G_c\\ \gamma_k^0(M), & M\in G_0\end{cases} \quad (k=1,2,\ldots,N)$$

სადაც:

$$\gamma_k^c(M)=\frac{1}{\sqrt{\rho^2+\left(x_3-z_3^k\right)^2}}+\frac{1}{\sqrt{\rho^2+\left(x_3+2H+z_3^k\right)^2}}+$$

$$+\frac{4P}{(P+1)}\sum_{i=0}^{\infty}\left\{\frac{\left(-\frac{P-1}{P+1}\right)^i}{\sqrt{\rho^2+\left[x_3-2iH+(2i+1)H+z_3^k\right]^2}}\right\},\quad (k=1,\,2,\,\ldots,\,N), \tag{57}$$

$$\gamma_k^0(M)=\frac{2P}{P+1}\sum_{i=0}^{\infty}\left\{\frac{\left(-\frac{P-1}{P+1}\right)^i}{\sqrt{\rho^2+\left[x_3+2i(H-H_1)+z_3^k\right]^2}}+\frac{\left(-\frac{P-1}{P+1}\right)^i}{\sqrt{\rho^2+\left[x_3-2iH+2(i+1)H_1+z_3^k\right]^2}}\right\}, \tag{58}$$

$$(k=1,\,2,\,\ldots,\,N).$$

აქ გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$\rho^2=\left(x_1-z_1^k\right)^2+\left(x_2-z_2^k\right)^2,\qquad P=\frac{\chi_c}{\chi_0},$$

$$\left\{z_1^k,\,z_2^k,\,z_2^k\right\}_{k=1}^N=\left\{M_0^k\right\}_{k=1}^N\in S_0.$$

რთული არ არის იმის ჩვენება, რომ $\gamma_k^c(M)$ და $\gamma_k^0(M)$ აკმაყოფილებს შემდეგ ტოლობებს:

$$\gamma_k^c=\gamma_k^0,\;\text{ როცა }\; x_3=-H \tag{59}$$

$$\chi_c\frac{\partial\gamma_k^c}{\partial x_3}=\chi_0\frac{\partial\gamma_k^0}{\partial x_3},\;\text{ როცა }\; x_3=-H \tag{60}$$

$$\frac{\partial\gamma_k^0}{\partial x_3}=0,\;\text{ როცა }\; x_3=-H_1\quad k=1,\,2,\,3,\,\ldots,\,N. \tag{61}$$

(59)÷(61) ტოლობების გათვალისწინებით შესაძლებელია $u_1(M)$ და $u_2(M)$ ფუნქციების მიახლოებითი მნიშვნელობების გამოსახულებების აგება G_c-ში და G_0-ში, შესაბამისად.

(49)÷(55) სასაზღვრო ამოცანის მიახლოებით ამოხსნაა:

$$u_N(M)=\begin{cases}u_{1N}(M),\; M\in G_c\\ u_{2N}(M),\; M\in G_0\end{cases} \tag{62}$$

იმის გათვალისწინებით, რომ ელექტრული წინააღმდეგობის განმსაზღვრავი (39) ფორმულის მარჯვენა მხარეში ინტეგრება ხდება S_1-ზე, რომელიც წარმოადგენს Γ_c ზედაპირის ნაწილს, კოლექტორის წინაღობის განსასაზღვრავად საკმარისია აიგოს

$u_{1N}(M)$ ფუნქცია და $\left(\chi_c \dfrac{\partial u_{1N}}{\partial \nu}\right)$ – ფუნქცია ვაინტეგროთ S_1-ზე. შედეგად მივიღებთ საბოლოო გამოსახულებას, რომელიც განსაზღვრავს დაბალომური ფენის შემცველი კოლექტორის წინაღობას:

$$\frac{1}{R_{GC}}=\frac{1}{\delta_C}\begin{vmatrix}
0,\ \eta_1,\ \eta_2,\ \ldots,\ \eta_N \\
-1,\ \gamma_1^c\left(M_{S_1}^1\right),\ \gamma_2^c\left(M_{S_1}^1\right),\ \ldots,\ \gamma_N^c\left(M_{S_1}^1\right) \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
-1,\ \gamma_1^c\left(M_{S_1}^n\right),\ \gamma_2^c\left(M_{S_1}^n\right),\ \ldots,\ \gamma_N^c\left(M_{S_1}^n\right) \\
0,\ \gamma_1^c\left(M_{S_{10}}^1\right),\ \gamma_2^c\left(M_{S_{10}}^1\right),\ \ldots,\ \gamma_N^c\left(M_{S_{10}}^1\right) \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
0,\ \gamma_1^c\left(M_{S_{10}}^m\right),\ \gamma_2^c\left(M_{S_{10}}^m\right),\ \ldots,\ \gamma_N^c\left(M_{S_{10}}^m\right) \\
0,\ \left.\dfrac{\partial\gamma_1^c}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^1},\ \left.\dfrac{\partial\gamma_2^c}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^1},\ \ldots,\ \left.\dfrac{\partial\gamma_N^c}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^1} \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
0,\ \left.\dfrac{\partial\gamma_1^c}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^e},\ \left.\dfrac{\partial\gamma_2^c}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^e},\ \ldots,\ \left.\dfrac{\partial\gamma_N^c}{\partial\nu}\right|_{M_{S2}^e}
\end{vmatrix}, \tag{63}$$

სადაც:

$$\eta_i=-\iint_{S_1}\chi\frac{\partial\gamma_i(M)}{\partial\nu}ds \tag{64}$$

თუ მართკუთხა კოორდინატთა სისტემას განვათავსებთ წინა შემთხვევის ანალოგიურად, გვექნება:

$$\frac{\partial}{\partial\nu}=\frac{\partial}{\partial x_3},\qquad ds=dx_1dx_2$$

და

$$\eta_i=-\iint_{S_1}\chi\frac{\partial\gamma_i(M)}{\partial\nu}dx_1dx_2. \tag{65}$$

მესუთე თავი ეძღვნება ბიპოლარული ტრანზისტორების ტევადური მახასიათებლების განსაზღვრას სამგანზომილებიანი მათემატიკური მოდელის საფუძველზე:

ტევადობების მატრიცა სიმეტრიული მატრიცაა:

$$\|C\|=\begin{pmatrix} C_{\mathrm{ee}}, & C_{\mathrm{ek}} \\ C_{\mathrm{ke}}, & C_{\mathrm{kk}} \end{pmatrix}, \tag{66}$$

რომლის ელემენტები წარმოადგენენ ემიტერისა და კოლექტორის p-n გადასასვლელების საკუთრივ ($C_{\mathrm{ee}}=C_{\mathrm{kk}}$) და ინდუქციურ ($C_{\mathrm{ek}}=C_{\mathrm{ke}}$) ტევადობებს.

სამგანზომილებიანი G არე, ამ შემთხვევაში, წარმოადგენს ბიპოლარული ტრანზისტორის მიერ დაკავებულ არეს (ნახ. 4), ხოლო S ზედაპირი მისი შემომსაზღვრელი ზედაპირია. S-ის ნაწილები, რომლებიც შეესაბამება ემიტერის, ბაზისა და კოლექტორის კონტაქტებს, შესაბამისად ავღნიშნოთ S_{e}, S_{b} და S_{k} -ით, ხოლო კონტაქტებისაგან თავისუფალი ზედაპირი - S_1-ით.

ტევადობითი მატრიცის კომპონენტების განსასაზღვრავად გამოვიყენოთ ტრანზისტორში ელექტრული ველის სრული ენერგია:

$$W=\frac{\varepsilon}{8\pi}\iiint\limits_{G}\left|\vec{E}\right|^{2}d\upsilon, \tag{67}$$

სადაც ε - ნახევარგამტარის დიელექტრიკული მუდმივაა, ხოლო $\vec{E}=-grad\ u$ - ელექტრული ველის დაძაბულობაა G-ში.

საძებნი ტევადობების მნიშვნელობები განისაზღვრება შემდეგი ფორმულებით:

$$C_{\mathrm{ee}}=\frac{\partial^{2}W}{\partial u_{\mathrm{e}}^{2}},\quad C_{\mathrm{kk}}=\frac{\partial^{2}W}{\partial u_{\mathrm{k}}^{2}},\quad C_{\mathrm{ek}}=C_{\mathrm{ke}}=\frac{\partial^{2}W}{\partial u_{\mathrm{e}}\partial u_{\mathrm{k}}}. \tag{68}$$

როოგრც ცნობილია, ბიპოლარულ ტრანზისტორებში სხვადასხვა ტიპისა და გამტარებლობის მქონე ნაწილების კონტაქტის არეებში წარმოიქმნებიან ლოკალური სივრცითი მუხტები და G-ში წარმოიქმნება სტაციონარული ელექტრული ველი პოტენციალით $u(M)$ $(M\in G)$.

S_{e}, S_{b} და S_{k} კონტაქტებზე, შესაბამისად, u_{e}, u_{b}, u_{k} პოტენციალების მოდების შემთხვევაში $u(M)$ აკმაყოფილებს შემდეგ სასაზღვრო ამოცანას:

$$\Delta u=-\frac{4\pi}{\varepsilon}\rho \qquad G\text{-ში} \tag{69}$$

$$u=u_{\mathrm{e}}, \qquad S_{\mathrm{e}}\text{-ზე} \tag{70}$$

$$u=u_{\mathrm{b}}, \qquad S_{\mathrm{b}}\text{-ზე} \tag{71}$$

$$u=u_{\mathrm{k}}, \qquad S_{\mathrm{k}}\text{-ზე} \tag{72}$$

$$\frac{\partial u}{\partial v}=0, \qquad S_1\text{-ზე} \tag{73}$$

სადაც $\rho(M)$ - სივრცითი მუხტების სიმკვრივეა G-ში და ის ცნობილი ფუნქციაა, $\vec{v}$ - S_1-ის გარე ნორმალია.

თუ გამოვიყენებთ გაუსის ცნობილ ფორმულას:

$$\iiint\limits_{G}u\Delta u d\upsilon=\iint\limits_{S}u\frac{\partial u}{\partial v}ds-\iiint\limits_{G}\left|grad\ u\right|^{2}d\upsilon,$$

და გავითვალისწინებთ (70)÷(73) სასაზღვრო პირობებს იმ დაშვებით, რომ $u_b=0$, ელექტრული ველის ენერგიის გამოსახულება ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$W(u_e, u_k) = \frac{1}{2}\iiint\limits_G u\rho d\upsilon + \frac{1}{8\pi}\left[u_e \iint\limits_{S_e} \frac{\partial u}{\partial \nu} ds + u_k \iint\limits_{S_k} \frac{\partial u}{\partial \nu} ds\right]. \qquad (74)$$

თუ გამოვიყენებთ აღნიშვნებს:

$$\left\{M_{S_e}^k\right\}_{k=1}^n \in S_e, \ \left\{M_{S_b}^k\right\}_{k=1}^m \in S_b, \ \left\{M_{S_k}^k\right\}_{k=1}^e \in S_k, \ \left\{M_{S_1}^k\right\}_{k=1}^\alpha \in \left(S - S_e - S_b - S_k\right),$$

$$\omega_0(M) = \frac{1}{\varepsilon}\iiint\limits_G \frac{\rho(M_\xi)}{r(M_1 M_\xi)} d\upsilon_\xi,$$

$$M_\xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3\} \in G, \quad d\upsilon_\xi = d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3$$

და (69)÷(73) სასაზღვრო ამოცანას ამოვხსნით მოცემული ნაშრომის მეორე თავში შემუშავებული მეთოდით და $u(M)$ ფუნქციის მიღებულ მნიშვნელობას შევიტანთ (74) ტოლობის მარჯვენა მხარეში, მაშინ (68) დამოკიდებულებების საშუალებით განვსაზღვრავთ სამებნ ტევადობებს.

დ ა ს კ ვ ნ ე ბ ი

1. დასმულია პუასონის განტოლების სამგანზომილებიანი სასაზღვრო ამოცანები ბიპოლარული ტრანზისტორის შემადგენლ არეებში (ემიტერი, ბაზა) განსაზღვრული სტაციონარული ელექტრული ველების პოტენციალების მიმართ, შრეული სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით.
2. დასმულია პუასონის განტოლების სასაზღვრო ამოცანა სტაციონარული ელექტრული ველის პოტენციალის მიმართ, რომელიც განსაზღვრულია ორი, ერთიდაიგივე ტიპის, მაგრამ განსხვავებული გამტარებლობების მქონე ნაწილისაგან შემდგარ სამგანზომილებიან არეში (დაბალომური ფენის შემცველი კოლექტორი), რომელიც შემოსაზღვრულია ნებისმიერი კონფიგურაციის საკმარისად გლუვი ზედაპირით, ხოლო შემადგენელი ნაწილების გამყოფი ზედაპირი არის სიბრტყე.
3. შემუშავებულია დასმული ამოცანების მიახლოებითი ანალიზური ამოხსნის მეთოდები.
4. შემუშავებულია ემიტერისა და ბაზის აქტიური წინააღმდეგობების განსაზღვრის მეთოდიკა ბიპოლარული ტრანზისტორის სამგანზომილებიანი მოდელის საფუძველზე.
5. შემუშავებულია დაბალომური ფენის შემცველი კოლექტორის აქტიური წინააღმდეგობის განსაზღვრის მეთოდიკა ბიპოლარული ტრანზისტორის სამგანზომილებიანი მოდელის საფუძველზე.
6. შემუშავებულია სამგანზომილებიანი ბიპოლარული ტრანზისტორული სტრუქ-ტურების ტევადური მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდიკა ტრანზისტორში ელექტრული ველის სრული ენერგიის მნიშვნელობის საშუალებით.

7. სადისერტაციო ნაშრომში შემუშავებული გარკვეული კლასის სამგანზომილებიანი სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნის მეთოდები, გარდა მიკროელექტრონიკისა, შეიძლება გამოყენებული იქნეს ფიზიკისა და ტექნიკის სხვა ამოცანების გადასაწყვეტადაც.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული სამეცნიერო ნაშრომების სია

1. Р.Ш. Гогсадзе, В.К. Гогичаишвили. Определение резистивных характеристик трехмерных биполярных транзисторных структур. Сообщ. АН ГССР, 1987, 127, №2. (стр. 357-359).
2. Р.Ш. Гогсадзе, В.К. Гогичаишвили. Об одном приближенном методе определения трехмерной модели электрического поля и его применение в расчете емкостных характеристик транзистора. Сообщ. АН ГССР, 1988, 130, №1, (стр. 157-159).
3. რ. გოგსაძე, ვ. გოგიჩაიშვილი. მათემატიკური მოდელირება მიკროელექ-ტრონიკაში, I ნაწილი (მონოგრაფია). თბილისი, სტუ, 2002 წ.
4. В.К. Гогичаишвили, Р.Ш. Гогсадзе, Т.Д. Мхеидзе. Некоторые задачи определения электрофизических параметров элементов интегральных микросхем. GEN, №3, стр. 68-70, 2005.